

フラーレンを推進剤とした負イオンスラストの実験的研究

○神田大樹（東京大学），國中均（JAXA）

1. 研究背景

イオンスラストは電気推進の中でも高比推力であるため推進剤消費量が少なく、惑星間航行、衛星の軌道制御に有利となる。実際、JAXAの小惑星サンプルリターンを成し遂げた「はやぶさ」や、NASAの複数小惑星ランデブーを行った「Dawn」はイオンスラストを用いている[1]。

しかし既存のイオンスラストは、正イオンビームスラストと宇宙器を中性に保つために電子を放出する中和器を用いるシステムであり、中和器は推力に寄与しないため推進剤と電力を無駄に消費している。中和器使用によりシステム全体の推進効率は、正イオンビームスラスト単体とくらべて低下する。よって図1のように中和器を排除し、代替として負電荷を射出する負イオンビームスラストを用いた正負イオンビームスラストシステムが構築できれば、スラストシステム全体としての理想化がおこなえる。

負イオンスラストの推進剤としては、フラーレンを用いること想定している。フラーレンはキセノンの5.5倍の質量をもつため、電圧効率が上昇し、中和器排除との相乗効果で推進効率の向上が見込まれる。

本論文ではフラーレン負イオンスラストの利点を述べたのち、負イオンスラストの初期実験結果について報告する。

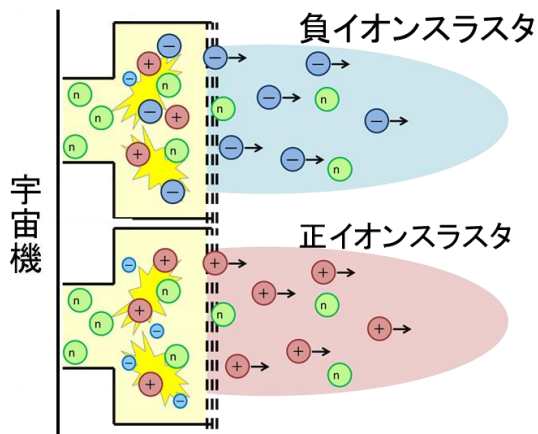


図1 正負イオンスラストシステム概念図

2. フラーレン負イオンスラストの利点

2.1. 負イオンスラスト適用による推進剤利用効率と電圧効率の上昇

負イオンスラストの適用に関する利点は、推力に寄与しない中和器に使用していた電力と推進剤の消費を削減することによるものである。電気推進機の重要な性能パラメータの1つとして推進効率があげられる。推進効率 η は、

$$\eta = \frac{F^2}{2\dot{m}P} = \eta_{div}^2 \eta_{multi} \eta_U \eta_V \eta_I$$

と表すことができる[2]。

中和器を利用するスラストシステムにおける推進剤利用効率 η_U と電圧効率 η_V は、

$$\eta_U = \frac{\dot{m}_{ex}}{\dot{m}_i + \dot{m}_n}$$
$$\eta_V = \frac{V_S}{V_S + C_i + C_n}$$

となる。ここで、 \dot{m}_{ex} は推力に寄与した推進剤流量、 \dot{m}_n はスラストヘッドに投入した推進剤流量、 \dot{m}_i は中和器に投入した推進剤流量を表す。また、 V_S は加速電圧、 C_i はイオン生成コスト、 C_n は中和コストを表す。このことより正負イオンスラストシステムの推進剤利用効率と電圧効率は、正と負のスラストヘッド性能が同じ場合、中和器が削減されるので上式の \dot{m}_n と C_n を0とした値と一致し、推進効率が上昇することがわかる。

2.2. 重分子フラーレン適用による電圧効率の上昇

既存のイオンスラストは推進剤としてキセノンを主に使用しているが、キセノンの5.5倍の質量をもつフラーレンを推進剤として使用することにより、電圧効率が上昇する。スラストヘッド単体の電圧効率は、

$$\eta_V = \frac{V_S}{V_S + C_i}$$

と表される。加速電圧 V_S は比推力 I_{sp} で表すと

$$V_S = \frac{Mg^2}{2e} I_{sp}^2$$

となるため、推進剤分子量 M が大きいほど V_S は大きくなる。よって同比推力では推進剤分子量が大きいほど電圧効率が高くなる。

3. 電子引き出しによる電力損失

負イオンスラスタに印加する加速電圧は、スラスタ内部から負電荷を引き出す電場を生成しているため、負イオンと同時に電子を引き出す可能性を含む。電子の質量は小さいため、推力にはほとんど寄与しない。よって図4に示すように電子の引出電流($I_b - I_{bi}$)に加速電圧をかけた電力はすべて損失となる。電子引き出しを抑制するために、グリッド付近の電子密度抑制が必要となる。

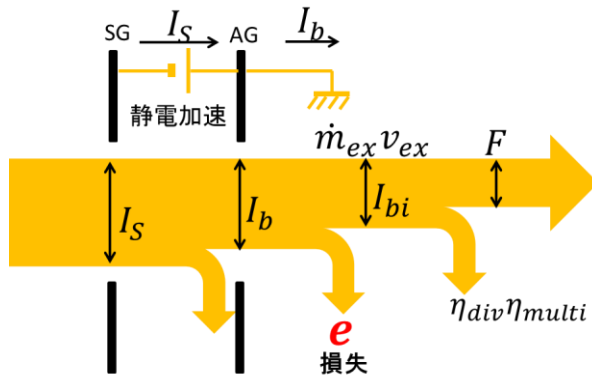


図2 負イオンスラスタの電流分配

4. フラーレンの供給

フラーレンは常温で粉末状の固体であるため、フラーレンをスラスタに供給するためには昇華装置が必要となる。本研究ではφ1の供給口が空いた銅容器にフラーレンを入れ、ヒータで外部から加熱することによりフラーレンを昇華し供給を行う。フラーレン昇華量を計測するため、フラーレンの質量減少量を電子天秤でリアルタイム測定を行った。図3にフラーレンの昇華レート測定結果の例を示す。

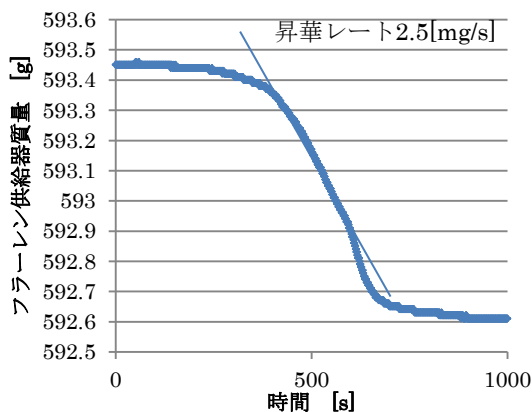


図3 フラーレン供給質量変化測定

5. 電子収集電極と磁気フィルタを用いた直流放電型イオンスラスタ

本研究では負イオンスラスタのプラズマ生成にフィラメントカソード直流放電型を用いた。直流放電型としたのは、フラーレンの電子付着断面積が大きく負イオン生成により電子密度が減少するため、プラズマを維持に電子源が必要なためである[3]。また電子引出抑制のため、イオンスラスタのプラズマ生成部と引出グリッドの間に永久磁石による最大磁場強度が24[mT]となる磁気フィルタを導入した。このときの電子のラーマ半径は200[μm]程度、イオンのラーマ半径は3[cm]程度となるため、電子が選択的にトラップされる。さらに磁気フィルタにトラップされた電子を収集する電子収集電極を磁気フィルタの直下に設置した。プラズマ源にはプラズマ源の回路図を図4に示す。

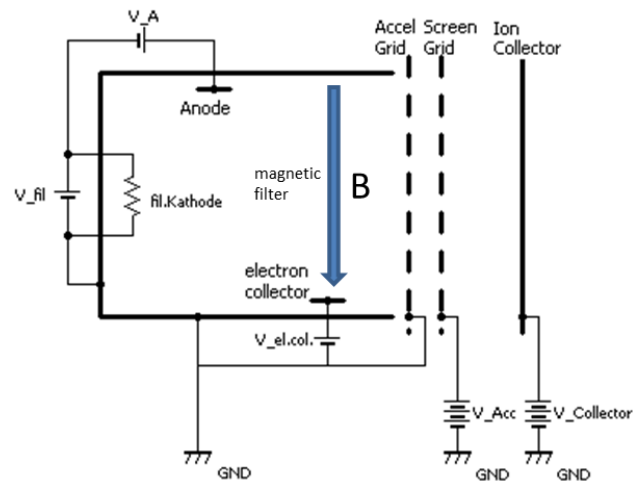


図4 直流放電型負イオンスラスタ回路図

6. 磁気フィルタを用いたプラズマ源による純フラーレンプラズマの生成

最大磁場箇所における純フラーレンプラズマの静電プローブ測定の結果を図5に示す。図より電子収集電極電圧が50[V]以上のときに、電子がほとんど存在しない正イオン-負イオンプラズマとなっていることがわかる。これは電子収集電極電圧がプラズマ電位(42[V])より低いとき電子はプラズマへと跳ね返されるが、電子収集電極電圧がプラズマ電位を上回ったときに磁気フィルタによりトラップされた電子を収集して電子密度が抑制されたためと考えられる。

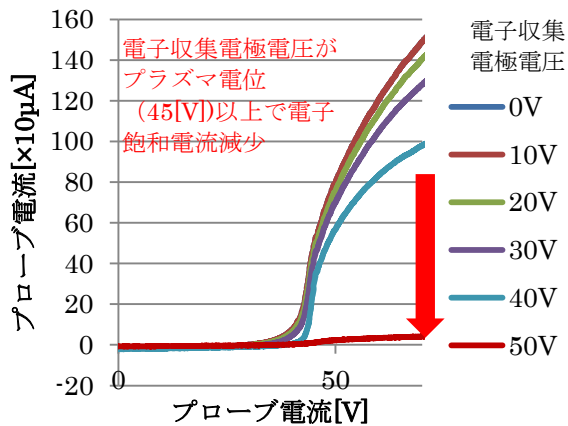


図5 磁気フィルタと電子収集電極を用いた純フラーレンプラズマのプロブ曲線

7. イオンコレクタを用いた負イオンビーム加速

純フラーレンプラズマを生成し、図4のようにイオンコレクタを用いてビーム引き出しを行った。正電荷引出を行うとスクリーン電流は0.42[mA]であり、負電荷の引出を行うとスクリーン電流は4.07[mA]であった。正電荷引き出し電流はフラーレン正イオンによるものだが、負電荷引き出し電流は電子と負イオンが含まれていると考えられる。ラングミュアプローブ計測により、フラーレンプラズマ中の正イオンと負イオン密度はほぼ等しい。また電子密度は小さいため、正イオンと負イオンのボーム速度もほぼ等しくなる。よってフラーレン正イオン引出電流とフラーレン負イオン引出電流は等しいと考えられる。よって負電荷引出電流4.07[mA]のうち、負イオン引き出し電流は0.42[mA]程度となる。

8. まとめ

本研究では、磁気フィルタを用いたフラーレン負イオンスラストの基礎実験を行った。磁気フィルタと電子収集電極を用いることにより、引出グリッド近傍の電子密度を抑制することに成功した。さらに負電荷引出を行い負電荷引出電流のうち10%程度が負イオン電流となった。しかし残りの90%は電子引出電流であり電子を加速した電力はすべて損失となる。負イオンスラストとして成立するためには負イオン引出電流の割合を100%に近づける必要があるため、さらに電子密度を抑制することが課題である。

参考文献

- 1) John R. Brophy: AIAA-2004-3433, 2004
- 2) 荒川義博, 國中均ほか: イオンエンジンによる動

力航行, コロナ社, 2006

- 3) 中山宜典, 東京都立科学技術大学平成10年度博士論文
- 4) P Chabert, T E Sheridan, R W Boswell and J Perrins, Plasma Sources Sci, Technol. 8,1999